

COMPORTAMIENTO FRENTE A LA CORROSIÓN DE BARRAS DE ACERO DE ARMAR EMBEBIDAS EN MORTEROS CON INCORPORACIÓN DE ESCORIAS BLANCAS DE HORNO CUCHARA

¹María Isabel Prieto; ²Alfonso Cobo; ³Ángel Rodríguez, ⁴Juan Manuel Manso;

¹ *Profesora Titular de Escuela Universitaria: Departamento de Tecnología de la Edificación, E.U. Arquitectura Técnica de Madrid*

² *Catedrático de Escuela Universitaria: Departamento de Tecnología de la Edificación, E.U. Arquitectura Técnica de Madrid*

³ *Director del Departamento de Construcciones Arquitectónicas e Ingenierías de la Construcción y del Terreno, Universidad Politécnica de Burgos*

⁴ *Director del Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica de Burgos*

Palabras Clave: *Corrosión, armaduras, morteros, escorias blancas LFS*

Resumen

El objetivo del presente trabajo es estudiar el comportamiento frente a la corrosión de barras de acero de armar embebidas en probetas de mortero, en las que se ha sustituido parcialmente el árido y el cemento por escorias blancas de horno cuchara (LFS) y se ha añadido en el momento del amasado distintos porcentajes de ión cloruro, en peso de cemento. Se han fabricado probetas prismáticas de 6x8x2 cm³, en las que se han embebido 3 barras de acero de diámetro 6 mm, con el fin de comparar el potencial de corrosión y la velocidad de corrosión, en las probetas patrón y en las probetas con escorias. Los resultados alcanzados permiten afirmar que el comportamiento frente a la corrosión inducida por iones cloruro en barras de acero embebidas en probetas patrón y en probetas fabricadas parcialmente con escorias blancas de horno cuchara son semejantes, tanto en las velocidades de corrosión alcanzadas como en el umbral de cloruros que produce la despasivación del acero.

Introducción

El hormigón armado, cuyo comienzo a nivel industrial, data de principio del siglo XX, es el material estructural más utilizado en construcción, ya que la unión acero-hormigón, permite aprovechar la elevada resistencia a tracción del acero con la elevada resistencia a compresión del hormigón, por lo que es un material perfecto para resistir esfuerzos de flexión y compresión, aunque la inclusión del acero en el hormigón conlleva una patología habitual en las estructuras de hormigón armado, que es la corrosión de las armaduras embebidas en el hormigón y que afecta a la durabilidad de las mismas, ya que es difícil conseguir elementos estructurales que no desarrollen fisuras trabajando a flexión, por efecto de las tracciones a que se encuentra sometido el hormigón [1].

Las armaduras embebidas en el hormigón se encuentran en estado pasivo debido al efecto protector de la alcalinidad que aporta el cemento al hidratarse. Esta protección se puede perder, bien por efecto de la penetración del dióxido de carbono de la atmósfera a través de los poros del hormigón (carbonatación)

o bien por la acción de los iones cloruros, que pueden introducirse bien en los materiales que lo componen o penetrar desde el exterior [2].

La norma EHE además de limitar la cantidad de cloruros que pueden poseer cada uno de los materiales componentes del hormigón, limita que el contenido total de cloruros en un hormigón que contenga armaduras no activas, debe ser inferior al 0,4% del peso de cemento en obras de hormigón armado o en obras de hormigón en masa que contenga armaduras para reducir la fisuración [3].

El coste económico que produce la corrosión asciende al 3,5% del producto interior bruto de un país, correspondiendo al sector de la construcción aproximadamente un 0,6%. Solo en España, el coste de la corrosión de las estructuras de hormigón armado asciende a 1200 millones de euros anuales [4] ascendiendo en Estados Unidos a la escalofriante cifra de $2,76 \cdot 10^{11}$ en el año 2002 [5]. Estas cifras incluyen solo los costes de mantenimiento y reparación (costes directos), siendo mucho más importantes los gastos indirectos, como las pérdidas de producción o los coeficientes de seguridad para paliar su efecto, las pérdidas de producción, etc.

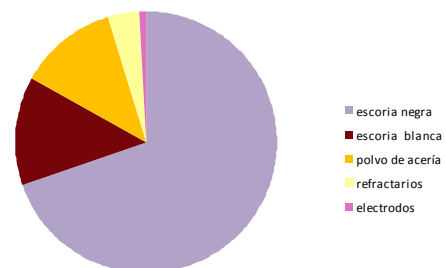
Pero además, el coste de la corrosión no es solo económico, sino ambiental y humano, ya que aún es más importante la conservación de los recursos naturales no renovables y del medioambiente, ya que la reducción de la producción de acero que se emplea en reparar el efecto de la corrosión, reduciría de manera notable los residuos y el consumo de energía generados en la producción del acero, reduciendo el impacto que se genera [6].

Por otro lado, la producción de acero de forma creciente a partir del siglo XIX, ha llevado a una descompensación entre las escorias producidas en los procesos de producción del acero y su posterior utilización, de modo que éstas generan en la actualidad un problema medioambiental importante al encontrarse abandonadas en los vertederos durante años [7].

La producción de acero bruto en el año 2010 en la Unión Europea, fue aproximadamente de 172,9 mt al año, siendo Alemania, el mayor productor de acero de la UE, produciendo 43,8 mt, seguido de Italia que produjo 25,8 mt y España 16,3 mt [8]. Según un estudio del año 2002, de la producción anual de acero en la Unión Europea, el 40% se produce en Hornos Eléctricos de Arco (EAF) y el 60% restante en Hornos de Acero al Oxígeno (BOF), mientras que en España, el 75% de la producción de acero se elabora en Hornos de Arco Eléctrico.

El porcentaje de residuos por tonelada de acero fabricado se puede observar en la figura 1, en la que se ve claramente que las escorias negras son el residuo predominante, entre 120-150kg por tonelada de acero producido, seguido de las escorias blancas, entre el 40-70kg por tonelada de acero.

Figura 1.- Cantidad de residuos generados en los procesos de fabricación del acero en horno eléctrico y horno cuchara.



La producción de aceros en Hornos de Arco Eléctrico y Horno cuchara en España genera anualmente escorias por valor de 2,55mt al año, solo superado por Alemania e Italia.

La cada vez mayor sensibilización social respecto a los problemas medioambientales hace que sea necesario incorporar en el proceso productivo procedimientos que permitan el reciclaje de los productos generados en la fabricación del acero integrándolos en los procesos de fabricación de otros materiales [9]. Aunque existen algunos estudios al respecto, como el de los Profesores Sáiz y Losáñez, en los que se estudian posibles aplicaciones de las escorias blancas de horno cuchara [10][11], no existen estudios de como influye la presencia de las escorias blancas de horno cuchara, en la corrosión de las barras de acero de armar embebidas en las probetas de mortero, siendo éste el objetivo del presente trabajo.

Trabajo experimental

Los materiales empleados para la realización de este trabajo experimental son cemento Pórtland CEM I/42,5 R, agua urbana potable, arena, escorias blancas de horno cuchara (LFS), plastificantes y retardadores de fraguado.

Las escorias blancas que se han empleado proceden de una factoría con sede en Álava, España. Una vez estabilizadas, se ha procedido a su caracterización, obteniendo las características físicas y químicas que se detallan en la tabla 1.

Para la realización de esta investigación se han fabricado dos series de cuatro morteros con diferentes dosificaciones de cemento, arena y agua, empleadas como probetas patrón (MCC) y otras, a las que se les ha añadido escorias blancas de horno cuchara (MCE), según se indican en la tabla 2.

Además se han añadido distintos porcentajes de ión cloruro (0, 0,4, 0,8, 1,2 y 2%) en peso de cemento en el momento del amasado.

Tabla 1: Características físicas y químicas de las escorias blancas de horno cuchara.

PROPIEDAD	VALOR	ÓXIDOS	(%)
Densidad	2,65 g/cm ³	CaO	56
Superficie específica	2064 cm ² /g	SiO ₂	17
Cloruros	Ausencia	Al ₂ O ₃	11
Cantidad total de azufre, expresada en ión sulfato	<1%	MgO	10
Terrones de arcilla	Ausencia	Otros (Fe ₂ O ₃ +MnO+TiO ₂ +SO ₃ +Na ₂ O+K ₂ O)	6
Materia orgánica.	Ausencia		

En este trabajo se han realizado probetas prismáticas de 6x8x2cm³ de mortero en las que se han embebido 3 barras de acero de armar de diámetro 6mm.

La barra intermedia se ha empleado como electrodo de trabajo, la barra de la derecha se ha utilizado como contraelectrodo y el electrodo de referencia

empleado es el de plata-cloruro de plata (SSCE; +0,199V SHE). Entre la probeta y el electrodo de referencia se ha colocado una bayeta húmeda, que permite mejorar el contacto entre ellos y la interfase acero-hormigón-atmósfera se ha protegido con una cinta adhesiva para evitar un posible ataque localizado por aireación diferencial. Una vez curadas las probetas se han desecado de forma natural, para ir humedeciéndolas de forma gradual y medir velocidades de corrosión y potenciales de corrosión en todas las probetas para su posterior comparación.

Tabla 2: Dosificaciones de las probetas patrón y de las probetas con escorias blancas de horno cuchara.

	RELACIÓN EN PESO (C/A/W/E)			
	CEMENTO	ARENA	AGUA	ESCORIAS
MDE	1	6,43	1,56	2,57
MDC	1	6	0,83	

Figura 2.- Montaje del experimento.



Resultados

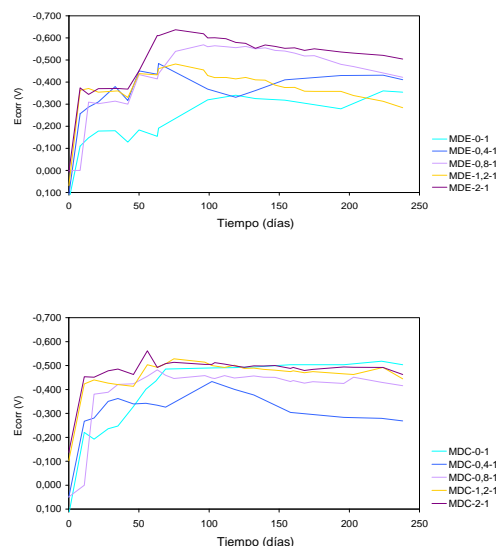
La figura 3 muestra mediante gráficos potencial de corrosión-tiempo, el comportamiento frente a la corrosión de las probetas con escorias blancas de horno cuchara y las probetas patrón, para diferentes porcentajes de ión cloruro.

En todas las probetas con escorias, los valores de potencial de corrosión demuestran el estado activo de las armaduras, independientemente del porcentaje de ión cloruros que posean. En este tipo de dosificación, el potencial se estabiliza aproximadamente a los 60 días.

En las probetas patrón, los potenciales de corrosión también indican el estado activo de las armaduras para los diferentes porcentajes de ión cloruro. En esta dosificación se encuentra muy marcada la estabilidad del potencial de corrosión en tiempos muy cercanos al inicio del experimento.

En la figura 3 queda patente la importancia de la humedad en la cinética de la corrosión, ya que en el estado inicial, con las probetas secas, el potencial de corrosión era incluso positivo y por tanto, las armaduras se encontraban en estado pasivo. Al comenzar a humedecerlas, el potencial crece de manera importante, para estabilizarse a partir de un determinado periodo de tiempo, en el que todas las probetas presentan potenciales propios del estado activo.

Figura 3.- Evolución del Ecorr con el tiempo, en probetas MDE y MDC y diferentes porcentajes de ión cloruro.



La figura 4 muestra que la velocidad de corrosión aumenta con el paso del tiempo tanto en probetas patrón como en probetas con escorias para porcentajes de ión cloruro del 0,4%, siendo mayor la velocidad de corrosión en probetas con escorias en las que se alcanzan velocidades propias del estado activo, que en las probetas patrón, que presentan velocidades de corrosión propias del estado pasivo. Para el porcentaje de ión cloruro del 0% tanto las armaduras embebidas en las probetas con escorias como en las probetas patrón se mantienen en estado activo.

En la figura 4, también se pueden observar las velocidades de corrosión correspondientes al porcentaje del 2% de ión cloruro tanto en probetas patrón como en probetas con escorias, de modo que en todas se alcanzan velocidades de corrosión propias del estado activo. Para porcentajes de ión cloruro del 0,8 y 1,2% se obtienen comportamientos semejantes al experimentado por las probetas con 2% de ión cloruro, de modo que a medida que aumenta el porcentaje de ión cloruro, la velocidad de corrosión aumenta tanto en las probetas patrón como en las probetas con escorias, obteniéndose valores de velocidad de corrosión propios del estado activo en todas las probetas, de modo que se puede decir que el comportamiento de las probetas patrón es similar al de las probetas con escorias para porcentajes de ión cloruro superiores al límite de la EHE.

La comparación de los resultados obtenidos y representados en las figuras 3 y 4 nos muestra que en las probetas con escorias, a medida que aumenta el E_{corr} aumenta la i_{corr} , obteniéndose resultados coherentes mediante ambas medidas, así como que a mayor cantidad de ión cloruro, mayores velocidades de corrosión.

En las probetas patrón sin cloruros, potenciales de corrosión propios del estado activo presentan velocidades de corrosión muy bajas, pudiendo llevarnos a error respecto al estado activo o pasivo de las barras, si solo empleamos como referencia el potencial de corrosión. En probetas patrón pero con un 2% de ión cloruro, potenciales de corrosión elevados coinciden con velocidades de corrosión altas y muy altas, por tanto si que se reproducen comportamientos semejantes por ambos métodos. Figura 5.

Figura 4.- Evolución del i_{corr} con el tiempo, en probetas MDE y MDC y diferentes porcentajes de ión cloruro.

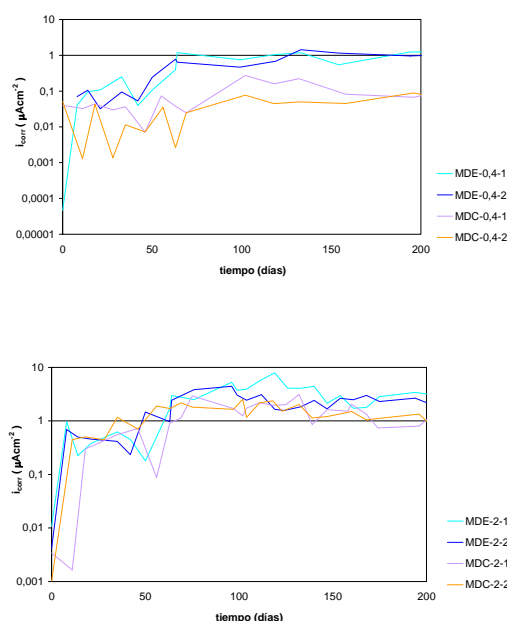
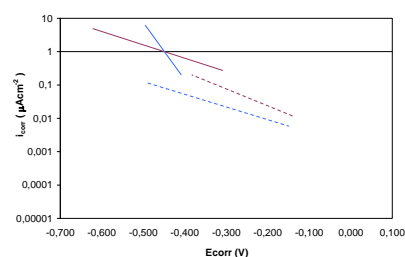


Figura 5.- Comparación de las líneas de tendencia entre E_{corr} e i_{corr} para las dosificaciones MDE y MDC con distintos porcentajes de ión cloruro en peso de cemento (0 y 2%).



Conclusiones

De todo lo expuesto, la respuesta al comportamiento relativo de las probetas con y sin escorias, cuando están atacadas exclusivamente por cloruros, es la siguiente:

- En probetas sin cloruros, se corroen más rápidamente las probetas con escorias que las probetas patrón.
- En probetas con un 0,4% de ión cloruro, límite de la norma EHE, los resultados no son concluyentes, aunque parece que las probetas con escorias se corroen más rápidamente que las patrón.
- En probetas con porcentajes de ión cloruro por encima de 0,4% en peso de cemento, el comportamiento frente a la corrosión en probetas patrón y en probetas con escorias es similar.

REFERENCIAS

- [1] SIRVENT, I., Tecnología y terapéutica del hormigón armado, 1ª – 1997, pp. 667-693.
- [2] GONZÁLEZ, J.A., “Corrosión en las estructuras de hormigón armado: Fundamento, medida, diagnosis y prevención”.- 2007, pp. 197 - 205.
- [3] EHE, “Instrucción de Hormigón Estructural”- 2008, pp. 105 -116.
- [4] MARTÍNEZ, R. Hormigón, “Inhibidores de corrosión para hormigón armado”, 38 - 1998, pp. 48.
- [5] THOMPSON, N., Mater. Prot., 44 – 2005, pp.16.
- [6] OTERO, E. “Corrosión y degradación de materiales” - 1997, pp.27 - 29.
- [7] APRÁIZ, J., Fabricación de Hierros, Aceros y Fundiciones - 1998.
- [8] www.portal-watch.es
- [9] ARANA, J.M., Procesos avanzados de producción de acero - 1994
- [10] LOSÁÑEZ, M., “Aprovechamiento integral de escorias blancas y negras de acería eléctrica en construcción y obra civil” - 2005.
- [11] RODRÍGUEZ, A., “Fabricación de morteros de albañilería con escoria blanca de horno cuchara y su utilización en construcción” - 2008.